

杨婷, 林先贵, 胡君利, 等. 2011. 发酵牛粪和造纸干粉对多环芳烃污染土壤菌根修复的影响 [J]. 环境科学学报, 31(1): 144-149

Yang T, Lin X G, Hu J L, et al. 2011. Effects of fermented cow dung and dry powdered sludge from papermaking waste on mycorrhizoremediation of PAH-contaminated soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(1): 144-149

# 发酵牛粪和造纸干粉对多环芳烃污染土壤菌根修复的影响

杨婷<sup>1,3</sup>, 林先贵<sup>1,2\*</sup>, 胡君利<sup>1,2</sup>, 张晶<sup>1,2</sup>, 吕家琰<sup>3</sup>, 王 一明<sup>1,2</sup>, 王俊华<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008

2. 中国科学院南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008

3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

收稿日期: 2010-04-28

修回日期: 2010-05-20

录用日期: 2010-05-24

**摘要:** 通过温室盆栽试验, 研究了添加发酵牛粪和造纸干粉对菌根化紫花苜蓿修复多环芳烃 (PAHs) 污染农田土壤的影响. 结果发现, 添加 0.5% ~ 2.0% 发酵牛粪对紫花苜蓿根系丛枝菌根 (AM) 真菌感染率无明显影响, 但均显著提高了紫花苜蓿的植株生物量 ( $p < 0.05$ ), 其中, 添加 1.0% 和 2.0% 发酵牛粪处理的土壤 PAHs 含量较对照略有降低. 添加 0.05% 和 0.1% 造纸干粉均显著提高了紫花苜蓿的 AM 真菌感染率和植株生物量 ( $p < 0.05$ ), 但添加 0.2% 造纸干粉却对紫花苜蓿的 AM 真菌感染率和植株生物量产生了显著的抑制作用 ( $p < 0.05$ ), 仅添加 0.05% 造纸干粉处理的土壤 PAHs 含量显著低于对照 ( $p < 0.05$ ), 且 3~5 环 PAHs 降解率均得到显著提高 ( $p < 0.05$ ). 此外, 土壤中 PAHs 降解率与 AM 真菌感染率之间呈线性回归关系 ( $R^2 = 0.247$ ,  $F = 6.217$ ,  $p < 0.05$ ). 以上结果表明, 添加适量 (0.5% ~ 2%) 发酵牛粪可通过直接增加养分供应来促进植物生长, 但对 PAHs 降解影响较小; 添加微量 (0.05% ~ 0.1%) 造纸干粉可通过增进 AM 真菌感染来促进植株生长, 加速 PAHs 降解, 因而可作为刺激性物质应用于菌根修复.

**关键词:** 多环芳烃; 菌根修复; 紫花苜蓿; 有机废弃物

文章编号: 0253-2468(2011) 01-144-06

中图分类号: X53

文献标识码: A

## Effects of fermented cow dung and dry powdered sludge from papermaking waste on mycorrhizoremediation of PAH-contaminated soils

YANG Ting<sup>1,3</sup>, LIN Xian-gui<sup>1,2\*</sup>, HU Jun-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, LÜ Jia-long<sup>3</sup>, WANG Yi-ming<sup>1,2</sup>, WANG Jun-hua<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2. Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008

3. College of Resources & Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100

Received 28 April 2010;

received in revised form 20 May 2010;

accepted 24 May 2010

**Abstract** A greenhouse pot-experiment was carried out to investigate the effects of fermented cow dung (FD) and dry powdered sludge of papermaking waste (PP) on phytoremediation of PAH-contaminated farmland soils by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) infected alfalfa (*Medicago sativa* L.). The addition of 0.5% to 2.0% FD had no significant effect on AMF infection rate, but could promote growth of alfalfa ( $p < 0.05$ ). PAH residues in the 1.0% and 2.0% FD treatments were lower than those in the control treatment. The addition of 0.05% and 0.1% PP enhanced AMF infection rate and plant biomass significantly ( $p < 0.05$ ), while a negative effect was observed for the 0.2% treatment ( $p < 0.05$ ). Significant degradation of PAH residues was observed only from the treatment with 0.05% PP ( $p < 0.05$ ), and the degradation rates of PAHs with three-, four- or five-ring were higher than those of the control ( $p < 0.05$ ). A linear regression relation was observed between PAH degradation rate in soil and the AMF infection rate in plant roots ( $R^2 = 0.247$ ,  $F = 6.217$ ,  $p < 0.05$ ). These results indicated that the appropriate amount (0.5% ~ 2%) of FD addition could increase nutrition to promote plant growth, but had little effect on the degradation of PAHs. However, small amounts (0.05% ~ 0.1%) of PP accelerated AMF infection to improve plant growth and the degradation of PAHs, suggesting that it could be used as a stimulant in mycorrhizoremediation of PAH-contaminated soils.

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2007AA061101); 国家自然科学基金项目 (No. 40801091)

**Supported by** the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2007AA061101) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40801091)

作者简介: 杨婷 (1984—), 女, E-mail lieryangting@163.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail xglin@issas.ac.cn

**Biography** YANG Ting (1984—), female, E-mail lieryangting@163.com; \* **Corresponding author** E-mail xglin@issas.ac.cn

**Keywords** polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); mycorrhizom ediation; alfalfa; organic wastes

1 引言 (Introduction)

多环芳烃 ( polycyclic aromatic hydrocarbons PAHs)是一类在环境中广泛存在且具有致癌、致畸、致突变作用的持久性有机污染物 (Hong *et al.*, 2008 Powell *et al.*, 2008). 近年来, 随着工业化进程的加快, 排放到环境中的 PAHs 越来越多. 研究表明, 排放到环境中的 PAHs 90% 以上可通过大气沉降等途径最终进入土壤 (W ild *et al.*, 1995). PAHs 能在土壤中长期残留且难以降解, 并可通过食物链富集、传递, 进而对人类健康产生潜在威胁, 因此, 有关 PAHs 污染土壤的修复问题已成为环境领域的一个热点 (W atanabe *et al.*, 2009 尹春芹等, 2008).

菌根修复技术是指综合利用土壤中的微生物、植物、菌根真菌及其相互作用的根际和菌 (丝) 际环境, 从而有效降解土壤中有机污染物的生物修复技术 (秦华等, 2006 ). 近年来, 菌根修复技术被逐渐应用到 PAHs 污染土壤的修复研究中 (L iu *et al.*, 2004 杨婷等, 2009). 研究表明, 微生物能够利用 PAHs 作为碳源和能源或利用其它物质作为共代谢底物对 PAHs 进行降解, 这是去除土壤中 PAHs 的主要途径 (Cern ğ lia 1992). 而在 PAHs 长期污染的土壤中, 土壤微生物数量及活性常出现下降, 从而导致菌根修复效率较低, 因此, 如何提高菌根修复效率就成为亟待解决的问题. 有机废弃物中含有大量营养元素和有机物质, 能为植物和微生物生长繁殖提供良好的环境, 目前已有将其用于提高 PAHs 降

解效率的研究 ( Baber *et al.*, 2008 K 3s tner *et al.*, 1996 杨婷等, 2009), 但还鲜见将其与菌根修复联用的研究报道. 鉴于此, 本文通过温室盆栽法, 在接种苏格兰球囊霉 36 号和种植紫花苜蓿的条件下, 研究添加发酵牛粪和造纸干粉对菌根修复 PAHs 污染农田土壤的影响, 以期为 PAHs 污染土壤的菌根修复提供理论依据与技术支持.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2 1 供试材料

供试土壤为采自江苏无锡安镇某受工业废水污染农田的表层土壤 (0~ 20 cm), 剔除植物根系、石砾等杂物, 过 2 mm 不锈钢筛, 混匀备用. 该土壤的基本化学性质如下: 有机质 25 1g• kg<sup>-1</sup>, 全 N 1. 24 g kg<sup>-1</sup>, 全 P 0 48 g• kg<sup>-1</sup>, 全 K 14. 2 g kg<sup>-1</sup>, 水解 N 78. 4mg kg<sup>-1</sup>, 速效 P 3 56mg kg<sup>-1</sup>, 速效 K 86 0mg kg<sup>-1</sup>, PAHs 13 9mg kg<sup>-1</sup>, pH = 6 1.

种植植物为紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L. ), 供试 AM 真菌为本实验室分离保藏的苏格兰球囊霉 (*G lamus caledon ium*) 36 号, 以河沙为基质、经苏丹草 (*Sorghum Sudanese* (P ĩ per) Stapf. ) 扩繁获得含有孢子、菌丝和侵染根段的 AM 菌剂.

供试发酵牛粪由南京中科院跨克科技有限责任公司提供, 供试造纸干粉由安徽新宇纸业有限公司亚硫酸铵法麦草制浆废液浓缩而得, 具有较强粘性. 两种供试有机废弃物的基本性质见表 1.

表 1 有机废弃物的基本性质  
Table 1 Basic properties of organic wastes

| 有机废弃物     | pH   | 有机质 /(g kg <sup>-1</sup> ) | 全 N/(g kg <sup>-1</sup> ) | 全 P/(g kg <sup>-1</sup> ) | 全 K/(g kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------|------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 发酵牛粪 (FD) | 6 89 | 169. 3                     | 15 10                     | 3. 71                     | 4. 92                     |
| 造纸干粉 (PP) | 5 74 | 83. 5                      | 29 64                     | 0. 05                     | 8. 73                     |

2 2 试验方法

盆栽试验在中国科学院南京土壤研究所日光温室中进行. 除不添加有机废弃物的对照 (CK) 外, 发酵牛粪依据常规施肥设定 0 5% (FD<sub>0.5</sub>), 1. 0% (FD<sub>1.0</sub>) 和 2 0% (FD<sub>2.0</sub>) 3 个添加水平, 造纸干粉参照实验室前期工作 (武术等, 2006) 设定 0 05% (PP<sub>0.05</sub>), 0 1% (PP<sub>0.1</sub>) 和 0 2% (PP<sub>0.2</sub>) 3 个添加水平, 共计 7 个处理, 每个处理 3 个重复. 采用底部有孔的盆钵 (高 14 cm、钵口直径 17 cm、钵底面直径

12 cm), 盛土 1 5kg, 按上述添加比例分别将有机废弃物与供试土壤混合均匀, 所有处理均层施 AM 菌剂 75g 加水至 50% 田间持水量, 静置过夜. 紫花苜蓿种子用质量分数为 10% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浸种 10 m in 经催芽后播于上述盆钵中, 出苗一周间苗, 每盆留苗 8 株, 30 d 时收获植株 (含根系), 并采集土壤样品, 风干, 过 0 84 mm 孔径筛, 用于分析 PAHs 含量.

2 3 分析方法

AM 真菌侵染率采用曲利苯蓝染色法 (Phillips

*et al.*, 1970)测定; 植株生物量采用常压恒温干燥法 (鲁如坤, 2000)测定; 土壤中的 PAHs 采用二氯甲烷索氏提取、高效液相色谱 (HPLC) 测定 (宋玉芳等, 1995). 测定的 15 种 PAHs 分别为: 萘、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并 [a] 蒽、蒽、苯并 [b] 荧蒽、苯并 [k] 荧蒽、苯并 [a] 芘、二苯并 [a,h] 蒽、茚并 [1,2,3-cd] 芘、苯并 [g,h,i] 花, 所用试剂二氯甲烷、正己烷、环己烷、乙腈均为 HPLC 级, 其它为分析纯. 色谱条件如下: 采用 Waters 2690 液相色谱仪及 Waters 2475 荧光检测器分析样品, 色谱柱为 4.6 mm × 250 mm 的烷基 C18 PAHs 专用柱, 流动相为色谱纯乙腈/超纯水 ( $V/V=70/30$ ), 流速为  $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 柱温为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 进样量为  $10\text{ }\mu\text{L}$ .

2.4 数据处理

采用 Excel 2003 制图并作线性回归分析, 采用 SPSS 11.5 进行方差分析 (Duncan 检验,  $p < 0.05$ ) 和回归方程的显著性分析 ( $F$  检验,  $p < 0.05$ ).

3 结果 (Results)

3.1 AM 真菌侵染率

不同处理条件下 AM 真菌侵染率如图 1 所示. 由图 1 可知, 添加 0.5% ~ 2.0% 发酵牛粪对 AM 真菌侵染率无明显影响, 且 AM 真菌侵染率随添加量的增加有下降趋势, 但与对照处理均无显著差异. 添加 0.05% 和 0.1% 造纸干粉能显著提高紫花苜蓿的 AM 真菌侵染率 ( $p < 0.05$ ), 而添加 0.2% 造纸干粉却显著降低了 AM 真菌侵染率 ( $p < 0.05$ ), 且随着添加量的增加, AM 真菌侵染率显著下降 ( $p < 0.05$ ).

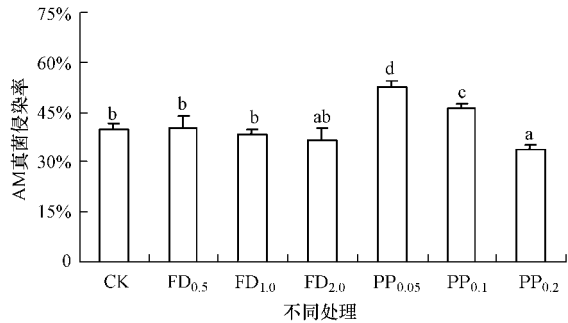


图 1 紫花苜蓿根系 AM 真菌侵染率 (不同字母表示在  $p < 0.05$  水平差异显著, 下同)

Fig 1 Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) infection rate in alfalfa roots (Different letters indicate significant differences at  $p < 0.05$  level)

3.2 植物生物量

不同处理条件下紫花苜蓿的生物量如图 2 所示. 由图 2 可知, 添加 0.5% ~ 2.0% 发酵牛粪均显著提高了紫花苜蓿的生物量 ( $p < 0.05$ ), 这可能是由于发酵牛粪有机质含量高, 营养元素丰富, 因而可为紫花苜蓿提供养分, 促进紫花苜蓿的生长, 且 1.0% 和 2.0% 处理组的生物量显著高于 0.5% 处理组 ( $p < 0.05$ ). 添加 0.05% 和 0.1% 造纸干粉能显著提高紫花苜蓿的植株生物量 ( $p < 0.05$ ), 而添加 0.2% 造纸干粉却显著降低了紫花苜蓿的生物量 ( $p < 0.05$ ), 且其生物量显著低于 0.05% 和 0.1% 处理组 ( $p < 0.05$ ), 可见添加 0.2% 造纸干粉不利于紫花苜蓿的生长.

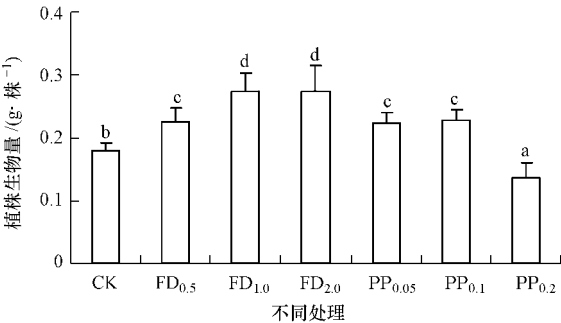


图 2 紫花苜蓿的植株生物量

Fig 2 Plant biomass of alfalfa

3.3 土壤 PAHs 残存量与降解率

与土壤本底值相比, 不同处理土壤中 PAHs 均有一定程度的降解. 由图 3 可知, 添加 0.5% ~ 2.0% 发酵牛粪或添加 0.1% 和 0.2% 造纸干粉对土壤 PAHs 残存量均无显著影响, 而添加 0.05% 造纸干粉却显著降低了土壤中 PAHs 的残存量 ( $p < 0.05$ ), 其 PAHs 总降解率平均值达到 39%, 比对照提高了 1 倍. 从表 2 可知, 添加 0.5% ~ 2.0% 发酵牛粪对 2 ~ 6 环 PAHs 降解均无显著影响, 添加

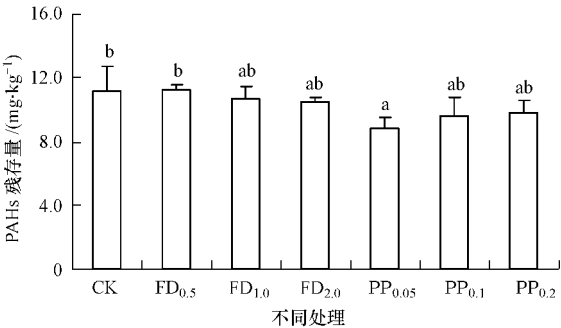


图 3 土壤中 PAHs 的残存量

Fig 3 PAH residues in different treatments

0.05% ~ 0.2% 造纸干粉对 2 环和 6 环 PAHs 的降解也无显著影响,但在添加 0.05% 造纸干粉条件下,3、4、5 环 PAHs 降解率均显著高于对照 ( $p < 0.05$ ),分别为对照的 3.4、1.7、2.6 倍;添加 0.1%

造纸干粉的作用次之,3 环、5 环 PAHs 的降解率显著高于对照处理 ( $p < 0.05$ );添加 0.2% 造纸干粉条件下,3~5 环 PAHs 降解率与对照相比无显著差异.

表 2 土壤中 PAHs 的分环降解率

| 处理                 | 不同环数 PAHs 降解率               |                             |                            |                            |                             |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                    | 2 环                         | 3 环                         | 4 环                        | 5 环                        | 6 环                         |
| CK                 | 67.0% ± 14.8% <sup>ab</sup> | 13.7% ± 1.1% <sup>ab</sup>  | 21.8% ± 4.4% <sup>a</sup>  | 15.1% ± 2.2% <sup>a</sup>  | 32.1% ± 3.2% <sup>ab</sup>  |
| FD <sub>0.5</sub>  | 78.4% ± 22.9% <sup>ab</sup> | 18.6% ± 3.5% <sup>abc</sup> | 21.4% ± 3.0% <sup>a</sup>  | 17.4% ± 7.1% <sup>a</sup>  | 23.8% ± 1.8% <sup>a</sup>   |
| FD <sub>1.0</sub>  | 53.2% ± 5.6% <sup>a</sup>   | 12.5% ± 0.6% <sup>ab</sup>  | 32.9% ± 6.1% <sup>ab</sup> | 28.9% ± 6.0% <sup>ab</sup> | 30.9% ± 7.2% <sup>ab</sup>  |
| FD <sub>2.0</sub>  | 85.4% ± 20.7% <sup>ab</sup> | 9.3% ± 9.0% <sup>a</sup>    | 26.3% ± 1.9% <sup>ab</sup> | 28.9% ± 5.0% <sup>ab</sup> | 34.1% ± 1.3% <sup>abc</sup> |
| PP <sub>0.05</sub> | 85.2% ± 29.5% <sup>ab</sup> | 46.3% ± 6.5% <sup>d</sup>   | 37.5% ± 9.4% <sup>b</sup>  | 39.0% ± 10.4% <sup>b</sup> | 38.6% ± 10.0% <sup>b</sup>  |
| PP <sub>0.1</sub>  | 91.8% ± 14.1% <sup>ab</sup> | 27.9% ± 7.2% <sup>c</sup>   | 28.5% ± 6.3% <sup>ab</sup> | 32.4% ± 7.3% <sup>cd</sup> | 35.7% ± 6.6% <sup>ab</sup>  |
| PP <sub>0.2</sub>  | 100.0% ± 0% <sup>b</sup>    | 22.0% ± 8.4% <sup>bc</sup>  | 27.6% ± 4.5% <sup>ab</sup> | 27.9% ± 3.0% <sup>ab</sup> | 36.6% ± 7.6% <sup>ab</sup>  |

注: 2 环 PAHs 为萘; 3 环 PAHs 为苣、苊、菲、蒽; 4 环 PAHs 为荧蒽、芘、苯并 [a] 蒽、蒾; 5 环 PAHs 为苯并 [b] 蒽、苯并 [k] 荧蒽、苯并 [a] 芘、二苯并 [a,h] 蒽; 6 环 PAHs 为茚并 [1,2,3-cd] 芘、苯并 [g,h,i] 芘.

3.4 土壤 PAHs 降解率与 AM 真菌侵染率之间的回归分析

由图 4 可知,土壤 PAHs 降解率与紫花苜蓿根系 AM 真菌侵染率之间呈线性回归关系 ( $F = 6.217, p = 0.022$ ),即植物根系的 AM 真菌侵染率越高,土壤中 PAHs 降解率也相对越高,这表明植物根系的 AM 真菌侵染状况会对土壤中 PAHs 的降解产生一定影响.因此,在菌根修复中,AM 真菌侵状况可以作为预测土壤中 PAHs 去除率高低的依据之一.

2000).本试验中,添加 0.5% ~ 2% 发酵牛粪显著提高了紫花苜蓿植株生物量,但 AM 真菌侵染率与植物生物量之间的关系不明显,说明发酵牛粪的主要作用是作为一种有机肥料直接促进植物的生长.添加造纸干粉条件下,AM 真菌侵染率高的处理所对应的植物生物量也相对较高,造纸干粉添加量在 0.05% ~ 0.1% 时对 AM 真菌侵染率和紫花苜蓿的生长均有利,添加量大于 0.2% 时则会对紫花苜蓿生长产生不利影响.因此,造纸干粉可视为一种刺激性物质,添加少量 (0.05%) 造纸干粉时,通过促进 AM 真菌对紫花苜蓿根系的侵染来促进植物的生长,造纸干粉过量 ( $> 0.2%$ ) 时,由于其自身粘性过大从而对土壤结构产生一定的影响,进而影响到土壤中水分及养分的传输并对紫花苜蓿的生长产生抑制作用,这与武术等 (2006) 的研究结果一致.

研究发现,土壤有机质含量对 PAHs 在土壤固液间的分配有显著影响,进而会影响到 PAHs 在土壤中的迁移状况和生物有效性 (Drolet *et al*, 1996).有机废弃物含有大量的有机物质和营养元素,不但可以改善植物和微生物的营养条件,还会影响到 PAHs 在土壤中的生物有效性,进而影响土壤中 PAHs 的生物降解.本试验结果表明,土壤中 PAHs 降解率与 AM 真菌侵染率之间呈线性回归关系,说明 AM 真菌侵染状况会影响土壤中 PAHs 的降解.添加发酵牛粪能显著提高紫花苜蓿生物量,但对 AM 真菌侵染率无明显影响,说明发酵牛粪作为一种营养丰富的有机肥料直接促进紫花苜蓿的

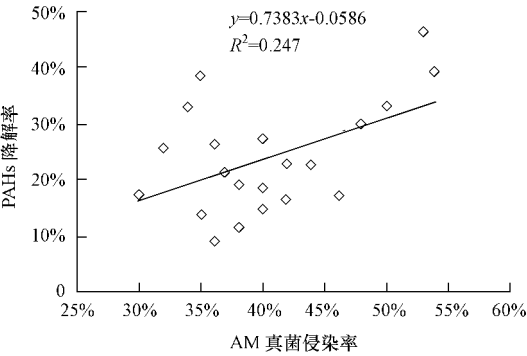


图 4 PAHs 降解率与 AM 真菌侵染率的线性回归分析  
Fig 4 Linear regression analysis of PAH degradation rate and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) infection rate

4 讨论 (Discussion)

研究表明,AM 真菌与植物共生通过提高植物矿质营养吸收,从而促进植物的生长 (Clark *et al*,

生长(于徐根等, 2007), 但对土壤 PAHs 的降解没有产生显著影响. 添加 0.05% ~ 0.1% 造纸干粉会显著提高 PAHs 的总降解率及 3~5 环 PAHs 降解率, 主要是通过增进 AM 真菌侵染来促进紫花苜蓿生长, 加速土壤 PAHs 的降解. 这是因为 AM 真菌侵染可通过扩大根际范围, 增加根系分泌物和特殊性酶的产生, 增加根际其它微生物的活性等途径促进土壤 PAHs 降解 (Joner *et al.*, 2003; 刘世亮等, 2004; Volante *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2008).

## 5 结论 (Conclusions)

1) 添加 0.05% ~ 0.1% 发酵牛粪可促进紫花苜蓿生长, 但对根系 AM 真菌侵染率和土壤 PAHs 降解率没有显著影响; 添加 0.05% ~ 0.1% 造纸干粉可增进 AM 真菌对紫花苜蓿根系的侵染并促进植株生长和加速 PAHs 降解, 而造纸干粉过量时则会产生抑制作用.

2) 土壤中 PAHs 的降解状况与植物根系 AM 真菌侵染率有密切关系, 添加 0.05% ~ 0.1% 造纸干粉可通过增进 AM 真菌侵染来提高菌根修复效率, 其中添加 0.05% 造纸干粉的效果最佳, 因此, 造纸干粉可作为刺激性物质应用于菌根修复.

责任作者简介: 林先贵 (1955—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤微生物学与菌根生态学研究. E-mail: xglin@issas.ac.cn

## 参考文献 (References):

- Baber B, K<sup>3</sup>geHKnabner I. 2008 Influence of origin and properties of dissolved organic matter on the partition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *European Journal of Soil Science* 48 (3): 443-455
- Cemiglia C E. 1992 Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbon: A review [J]. *Biodegradation*, 3(2/3): 351-368
- Clark R B, Zeb S K. 2000 Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants [J]. *Journal of Plant Nutrition* 23(7): 867-902
- Drolet C, Banton O, Lafrance P, *et al.* 1996 Assessing the fate of polynuclear aromatic hydrocarbons from oily waste land spreading by modeling [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering* 23(1): 211-217
- Hong Y W, Yuan D X, Lin Q M, *et al.* 2008 Accumulation and biodegradation of phenanthrene and fluoranthene by the algae enriched from a mangrove aquatic ecosystem [J]. *Marine Pollution Bulletin* 56(8): 1400-1405
- Joner E L, Leyval C. 2003 Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza [J]. *Environmental Science and Technology*, 37(11): 2371-2375
- K<sup>3</sup>stner M, Mahro B. 1996 Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by the organic matrix of compost [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 44(5): 668-675
- Liu S L, Luo Y M, Cao Z H, *et al.* 2004 Degradation of benzo[a]pyrene in soil with arbuscular mycorrhizal alfalfa [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2): 285-293
- 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 2004 苯并[a]芘污染土壤的丛枝菌根真菌强化植物修复作用研究 [J]. *土壤学报*, 41(3): 337-342
- Liu S L, Luo Y M, Ding K Q, *et al.* 2004 Enhanced phytoremediation of benzo[a]pyrene contaminated soil with arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Acta Pedologica Sinica* 41(3): 337-342 (in Chinese)
- 鲁如坤. 2000 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社. 302-304
- Lu R K. 2000 Soil Agrochemistry Analysis Methods [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press 302-304 (in Chinese)
- Phillips JM, Hayman D S. 1970 Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1): 158-160
- Powell S N, Singleton D R, Aitken M D. 2008 Effects of enrichment with salicylate on bacterial selection and PAH mineralization in a microbial community from a bioreactor treating contaminated soil [J]. *Environmental Science and Technology*, 42(11): 4099-4105
- 秦华, 林先贵, 尹睿, 等. 2006 丛枝菌根真菌和两株细菌对土壤中 DEHP 降解及绿豆生长的影响 [J]. *环境科学学报*, 26(10): 1651-1657
- Qin H, Lin X G, Yin R, *et al.* 2006 Influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and two bacterial strains on DEHP degradation and growth of mung bean in soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(10): 1651-1657 (in Chinese)
- 宋玉芳, 区自清, 孙铁珩. 1995 土壤、植物样品中的多环芳烃 (PAHs) 分析方法研究 [J]. *应用生态学报*, 6(1): 92-96
- Song Y F, Ou Z Q, Sun T H. 1995 Analytical method of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and plant samples [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6(1): 92-96 (in Chinese)
- Volante A, Lingua G, Cesaro P, *et al.* 2005 Influence of three species of arbuscular mycorrhizal fungi on the persistence of aromatic hydrocarbons in contaminated substrates [J]. *Mycorrhiza*, 16(1): 43-50
- Watanabe M, Noma Y. 2009 Influence of combustion temperature on formation of nitro PAHs and decomposition and removal behaviors in pilot-scale waste incinerator [J]. *Environmental Science and Technology*, 43(7): 2512-2518
- Wid S R, Jones K C. 1995 Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: a preliminary source inventory and budget [J]. *Environmental Pollution*, 88(1): 91-108
- Wu N Y, Zhang S Z, Huang H L, *et al.* 2008 Enhanced dissipation of phenanthrene in spiked soil by arbuscular mycorrhizal alfalfa combined with a non-ionic surfactant amendment [J]. *Science of the Total Environment*, 394(2/3): 230-236

- 武术, 林先贵, 施亚琴. 2006. 亚铵法造纸废液干粉对绿豆苗根系的 AM 真菌侵染及其地上部生物量的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 22(2): 45-48
- Wu S, Lin X G, Shi Y Q. 2006. Effects of dry powdered sludge of black liquid from papermaking with Ammonium sulfite method on AM fungi infection and biomass of vigna radiate [J]. Journal of Ecology and Rural Environment 22(2): 45-48 (in Chinese)
- 杨婷, 胡君利, 王小明, 等. 2009. 发酵牛粪和造纸干粉对土壤中多环芳烃降解的影响 [J]. 生态环境学报, 18(6): 2161-2165
- Yang T, Hu J L, Wang Y M, et al. 2009. Effect of fermented cow dung and dry powdered sludge of papermaking waste on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil [J]. Ecology and Environment 18(6): 2161-2165 (in Chinese)
- 杨婷, 林先贵, 胡君利, 等. 2009. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿与黑麦草修复多环芳烃污染土壤的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 25(4): 72-76
- Yang T, Lin X G, Hu J L, et al. 2009. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on phytoremediation of PAHs-contaminated soil by *Medicago sativa* and *Lolium multiflorum* [J]. Journal of Ecology and Rural Environment 25(4): 72-76 (in Chinese)
- 尹春芹, 蒋新, 杨兴伦, 等. 2008. 施肥对花红苋菜吸收和积累土壤中 PAHs 的影响 [J]. 中国环境科学, 28(8): 742-747
- Yin C Q, Jiang X, Yang X L, et al. 2008. Influence of fertilization on flower red Amaranth uptake and accumulation of PAHs in soil [J]. China Environmental Science, 28(8): 742-747 (in Chinese)
- 于徐根, 欧阳延生, 李翔宏, 等. 2007. 牛粪和石灰对苜蓿出苗和草产量的影响 [J]. 草业科学, 24(7): 55-57
- Yu X G, Ouyang Y S, Li X H, et al. 2007. Effect of cattle manure and lime application on the seeding rate and yield of alfalfa [J]. Pratacultura Science, 24(7): 55-57 (in Chinese)